第39卷 第5期 干 旱 区 研 究 Vol. 39 No. 5
2022年9月 ARID ZONE RESEARCH Sep. 2022

石羊河流域水生态安全影响因子及驱动机制研究

戴文渊[1]， 郭 武[1]， 郑志祥[2]， 陈亦晨[1]， 张 芮[3]， 许 勇[1]

（1. 甘肃政法大学环境法学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省证据科学技术研究与应用重点实验室，甘肃 兰州 730070；3. 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：基于W-SENCE-PSR（以水为主线的复合生态系统-压力状态响应）框架模型构建水生态安全评价指标体系，利用2009—2018年石羊河流域相关统计数据，运用模糊系统分析法和BP神经网络模型法，多层面多角度解析石羊河流域的水生态安全驱动机制。结果表明：（1）当年降水变化、单位面积牲畜头数、生态环境用水量占总用水量比例、雨水利用量、径污比是水生态安全的主要影响因子；（2）对水生态安全的影响程度排序为：资源子系统≥社会子系统>经济子系统>环境子系统>生态子系统，响应子系统>压力子系统>状态子系统，资源子系统和压力子系统是主要驱动力来源；（3）2019—2023年，压力子系统和环境子系统将是主要驱动力来源；（4）近10 a，水生态安全整体状况较差，始终处于Ⅰ级区（较差）和Ⅱ级区（一般）。

关键词：复合生态系统；模糊系统分析；BP神经网络；水生态安全；石羊河流域

目前，从复合生态系统视角研究水生态安全弥补了以往研究中“就水言水”的缺陷，已成为流域管理的新趋势，显示出了极大的优越性，对流域的综合治理和高质量发展意义重大[1]。随着水生态文明建设的进一步展开和推进，推动流域综合治理及生态保护，创建流域系统综合保障和治理体系的任务紧迫；近年来，水生态安全相关研究也越来越引起了社会各界的高度关注[2-3]。西北内陆河流域，尤其是石羊河流域，是我国内陆河流域中，人口密集、水资源的开发利用率高且供需矛盾突出、生态环境问题较为突出的典型流域，其水文循环及生态功能有衰退现象，生态系统功能“局部改善、整体退化”的趋势仍在继续，生态环境恶化且有向系统性水危机转变的风险[4-6]，因此，厘清石羊河流域水生态安全状况，研究水生态安全主要影响因子，开展水生态安全状况系统分析，探究其驱动机制就显得尤为重要[7-9]。

水有改善环境、资源供给和生态维持的三重功能，水生态安全因此也兼有经济、社会和自然属性，它是以水为主线的水生态资源、环境和灾害的综合效应。水生态安全问题不能单纯看作水问题，它伴随着人们的经济社会发展与生产生活方方面面，已经纳入了国家安全战略。水生态安全[10-11]是以人为本的战略性概念，目的是为了实现人水和谐，指国家、区域等层面内水能够支撑人类经济社会发展需求，既要防止因水问题对经济社会可持续发展能力的削弱，又要防止发生系统性水危机；水生态安全相关研究属多学科的交叉与融合范畴，虽已建立了相关基础模型和研究方法[12-16]，能较清晰地阐明水生态系统中各子系统间的因果关系，注重对现状的分析研究；但绝大多数是基于PSR（压力-状态-响应）及扩展模型，模型构建中主观意识较强。同时，现有研究还存在以下不足：（1）水生态安全评价体系构建存在“就水言水”的缺陷，关注水的综合影响的较少；（2）目前水生态安全研究还处于理论体系构建阶段，很少涉及深层次驱动机制方面的研究；（3）绝大多数研究是基于PSR系统视角，从W-SENCE（以水为主线的经济-社会-自然复合生态系

收稿日期：2022-02-02； **修订日期：**2022-06-23

基金项目：甘肃政法大学校级重点项目（GZF2021XZD05）；2022年度甘肃省高等学校青年博士基金项目（2022QB-120）；2022年度甘肃省哲学社会科学规划项目（基于区域水生态安全的“兰白定临”协同发展研究）；2021年度甘肃省“双一流”建设科研重点项目（黄河流域生态保护协同治理的法治保障研究）；2020年度甘肃省高等学校产业支撑计划项目（2020C-32）；甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目（22GSLK047）

作者简介：戴文渊（1989-），男，博士，主要从事资源与环境法学、生态安全评价研究. E-mail: 13993181879@163.com

通讯作者：郭武. E-mail: guowu_el@hotmail.com

统)视角和PSR系统视角相结合进行流域水生态安全分析的较少;(4) 关注现状的多,预警分析的少。因此,本文构建了基于W-SENCE-PSR(以水为主线的复合生态系统-压力状态响应)框架的内陆河流域水生态安全最新评价指标体系,充分体现了水的相互作用关系(PSR系统),及相对状态安全(SENCE系统),发挥了该系统框架结构明晰和因果逻辑关系明确的优势,提高了体系的理论和实践应用价值;通过对近10 a间石羊河流域水生态安全影响因子及驱动机制的实证研究,开展了水生态安全现状及预警评价,进行了流域水生态安全的影响因子和分系统综合效果分析,为研究区的流域水行政管理、风险预警、水生态安全制度完善等工作提供了科学依据。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

石羊河流域位于101°41′~104°16′E,36°29′~39°27′N之间,流域面积约4.16×10^4 km^2,地势整体上呈南高北低,由西南向东北方向倾斜;石羊河流域的主要河流有西大河、东大河和黄羊河等共计8条支流,高山的冰雪融水以及降水是这些河流的主要补给来源。从行政区划上来看,石羊河流域主要有4市9县,即金昌市、武威市的凉州区、张掖市和白银市的部分区域。石羊河流域南部和北部为山地,中部走廊为平原区,流域大致划分为3个气候区,即南部祁连山高寒半干旱区,降水300~600 mm,年蒸发量700~1200 mm,干旱指数1~4,年平均气温2~6 ℃;中部平原干旱区年降水量150~300 mm,年蒸发量1300~2000 mm,干旱指数4~15,年平均气温小于6~8 ℃;北部温暖干旱区年降水量小于150 mm,年蒸发量2000~2600 mm,干旱指数15~25,年平均气温小于8 ℃。流域属于大陆性干旱气候,降水稀少同时蒸发强烈,空气比较干燥且温差较大,第一产业所负担的人口比重比较大,绿洲区承载人口密度大,同时该区也是甘肃工农业发达、人口集中、供水用水矛盾突出,生态恶化程度最严重的区域之一[17-20],是西北干旱区人水关系不协调的典型代表区域。

1.2 数据收集及统计分析

为了方便数据收集及统计分析,在本研究中,流域分区与甘肃省水资源公报、甘肃省统计年鉴等统计数据的划分标准保持一致,采用三级划分。在进行调查和评价分析中,资源子系统、环境子系统、生态子系统方面的相关数据通过甘肃省水文局提供的统计资料和《石羊河流域水资源公报》(2009—2018年)中获取;经济子系统和社会子系统方面的数据主要通过《甘肃省统计年鉴》(2009—2018年)获得;流域水资源行政管理类相关数据主要通过水利部门公开的信息和年度报告等方式获得。

由于受数据获取限制,研究数据选用了石羊河流域2009—2018年10 a的数据为基础,运用BP神经网络模型预测了2019—2023年间数据变化,在数据统计分析和处理过程中分别运用了Microsoft Office Excel 2003软件和MATLAB R2014a软件。

2 研究方法

流域水生态安全的目标是提高可持续发展意识,合理开展水资源的开发和利用,最终达到人水和谐;开展流域水生态安全的分析评价,不仅仅涉及到水资源领域,还涵盖区域与水有关的经济系统、社会系统及自然系统的综合性问题[21-23]。水生态安全研究涉及水科学、生态学、安全学科、环境法学等研究领域,需从复合生态系统视角进行综合分析[24-28]。

2.1 基于W-SENCE-PSR框架的水生态安全评价体系

在内陆河流域的水生态安全评价指标体系创建过程中,结合已在水生态安全评价方面所建立的理论基础、实践经验及指标频次分析[11,29-32],从复合生态系统视角出发,建立了水资源、水环境、水生态、经济和社会发展5个方面33个指标构成的干旱内陆河流域水生态安全评价指标体系[11-18](图1)。

2.2 基于模糊系统分析的影响因子确定

运用模糊系统分析确定指标权重主要有以下几个步骤:

(1) 数据标准化。具体按“Min-max标准化”方法进行数据处理[5,11]。

(2) 建立模糊矩阵R[5,11]和模糊相关矩阵U。

$$U=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & a_{ij} & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:a_{ij} 为矩阵元,$a_{ij}\in[0,1]$;$i=1,2,3,\cdots,n$。

(3) 模糊相关程度分析。按照模糊相关矩阵

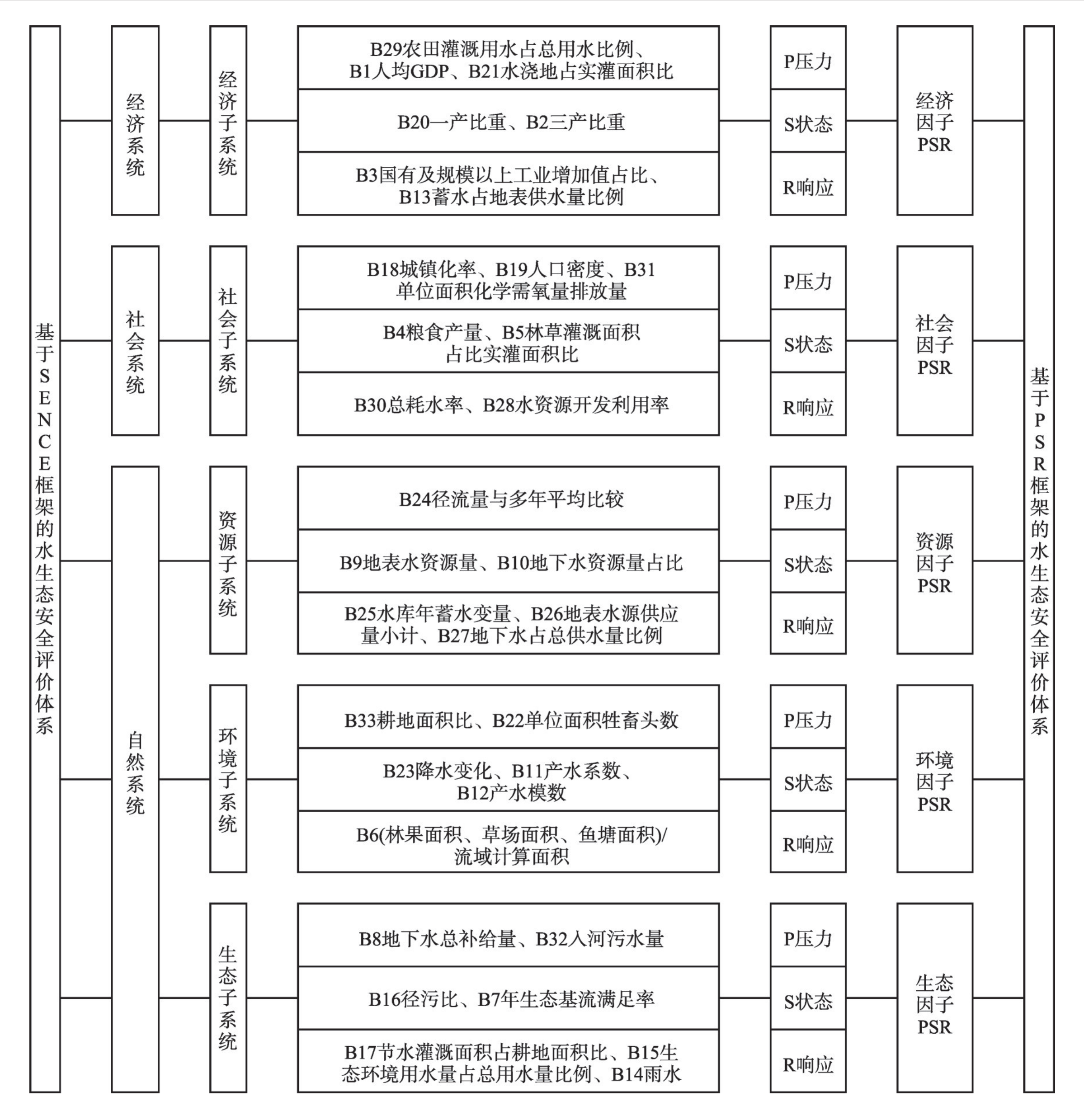


图1　基于W-SENCE-PSR框架的流域水生态安全评价指标体系

Fig. 1　Water ecological security evaluation based on W-SENCE-PSR conceptual framework

U,根据最大矩阵元定理,得出各个评价指标的置信水平;并由下式分别得出各评价指标的权重。

$$W_i = \frac{1-\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n}(1-\lambda_i)} \tag{2}$$

式中:W_i 为第 i 项流域水生态安全评价指标的指标权重;λ_i 为第 i 项评价指标的置信水平;$i=1,2,3,\cdots,n$。

根据模糊系统分析法确定了流域水生态安全评价指标的指标权重大小,它表征的是该指标在整体系统中相对重要的程度,可以得出影响石羊河流域水生态安全的最主要因子。

2.3　基于BP神经网络的指标值预测

BP算法已被普遍运用到指标值的预测中,在本文中,依次运用newff函数进行网络建立,init函数进行初始化;train函数进行网络训练;sim函数进行网络仿真[11]。

2.4　基于模糊综合评价的驱动力系统分析

按照已创建好的水生态安全评价指标体系,对流域水生态安全状况进行模糊综合评价,得到的评价向量由因素权重向量与模糊矩阵合成。即:

$$Y = RX = (y_1, y_2, \cdots, y_n)^T \tag{3}$$

式中:Y 指评价向量;$y_1, y_2, \cdots, y_n$ 为流域各年模糊综合评价指数;R 为流域水生态安全评价指标标准化

数据矩阵；X为流域水生态安全评价指标权重向量；T为向量转置符号。

3 结果与分析

3.1 影响因子确定分析

基于模糊系统分析的影响因子确定，由公式(2)计算得出，石羊河流域水生态安全评价指标的权重值，指标权重值分布情况如图2。

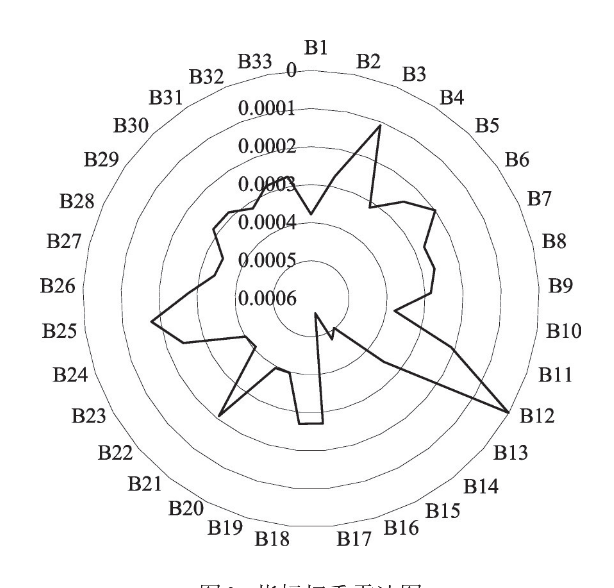


图2　指标权重雷达图

Fig. 2　Index weight entirely

由石羊河流域水生态安全指标的权重值可知，指标B14(雨水利用量)、B15(生态环境用水量占总用水量比例)、B16(径污比)、B22(单位面积牲畜头数)、B23(当年降水变化)的指标权重值相对较大，分别为：0.0503、0.0480、0.0560、0.0407、0.0401，因此，上述5个指标为石羊河流域水生态安全的最主要影响因子，这些评价指标的累计贡献率为23.5%。指标B3(国有及规模以上工业增加值占比)、B6〔(林果面积、草场面积、鱼塘面积)/流域计算面积〕、B12(产水模数)、B25(水库年蓄水变量)的指标权重值相对较小，分别为：0.0101、0.0200、0.0001、0.0176，指标的累计贡献率仅为4.7%。因此，以上这4个指标为石羊河流域水生态安全的次要影响因子。

3.2 水生态安全现状系统分析

基于模糊综合评价的驱动力系统分析，由公式(3)计算得到，石羊河流域2009—2018年间的水生态安全模糊综合评价向量Y_1：

$$Y_1=(0.2785, 0.3205, 0.2954, 0.3019, 0.2979, 0.2723, 0.2982, 0.3203, 0.3351, 0.3065)^T$$

参照2013年环境保护部发布的《流域生态健康评估技术指南》和2016年水利部发布的《江河生态安全调查与评估技术指南》，以及学者们关于模糊综合评价结果的分类方法相关研究[11-18]，将石羊河流域的水生态安全模糊综合评价指数值按照标准分为以下3个等级：$Y<0.3$为Ⅰ级，表征流域水生态安全状况为较差；$0.3\leq Y\leq 0.45$为Ⅱ级，表征流域水生态安全状况为一般；$Y>0.45$为Ⅲ级，表征流域水生态安全状况为良好。根据以上的安全等级分级标准，依次对石羊河流域近10 a间的水生态安全状况进行分级。结果显示，石羊河流域水生态安全状况呈波动变化态势，整体上水生态安全的状况相对较差，10 a中有5 a的水生态安全状况处于Ⅰ级；2015年后均处于Ⅱ级，可能与此时石羊河流域实施了一系列重点治理工程作用不断显现有关[11,13,17]；近年来，通过上下游联动，实施关井压田、节水改造、水资源配置保障、生态建设、水源涵养等措施，石羊河尾闾湖青土湖出现大片湿地，生态环境有所好转[11]。

3.2.1 W-SENCE系统分析　通过W-SENCE系统(以水为主线的经济-社会-自然复合系统)分析表明(图3)，石羊河流域社会子系统和资源子系统对整个系统的安全状况影响相对较大，2个子系统的模糊综合指数为0.08，两者累计贡献率达47%以上，是流域水生态安全的最主要驱动力来源。生态子系统对流域水生态安全的影响相对较小，模糊综合评价指数为0.05，贡献率仅为17%。因此，石羊河流域的水资源和社会发展对流域水生态安全影响最大，需特别关注石羊河流域的资源性缺水问题和社会发展变化情况，确保水资源与社会发展情况相适宜，推动人水和谐。

3.2.2 PSR系统分析　通过水生态安全的PSR系统(压力-状态-响应)分析表明(图4)，石羊河流域响应子系统对水生态安全的影响相对较大，模糊综合指数为0.120，累计贡献率达40%，其次为压力子系统，模糊综合评价指数为0.110，累计贡献率为36%，状态子系统影响相对最小，模糊综合评价指数为0.074，累计贡献率为24%。因此，响应子系统是石羊河流域水生态安全的主要驱动力来源，需尽可能减少人类活动对环境的不良影响，并结合各子系统具体情况，采取对应措施，提升流域水生态安全

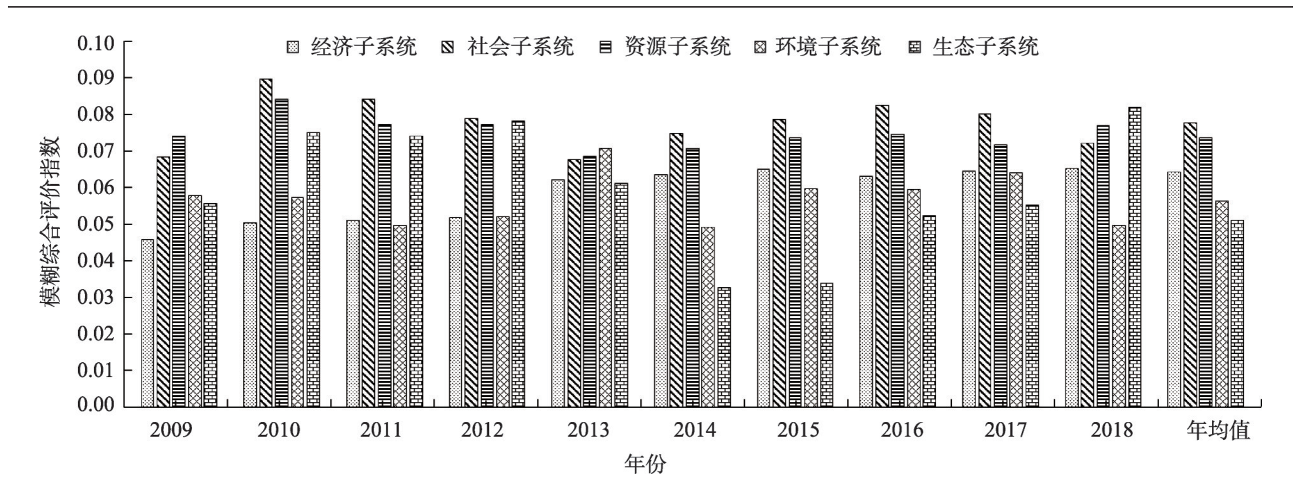


图3 基于W-SENCE系统分析的石羊河流域水生态安全评价结果

Fig. 3 Fuzzy comprehensive evaluation results of water ecological security evaluation based on the W-SENCE system

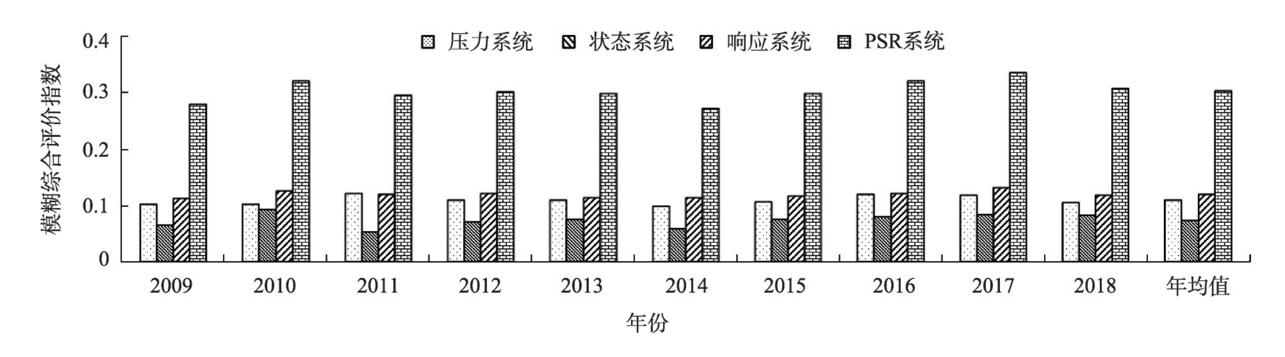


图4 基于PSR系统的水生态安全评价结果

Fig. 4 Fuzzy comprehensive evaluation results of water ecological security evaluation based on the PSR system

状况。

3.3 水生态安全预警系统分析

3.3.1 基于BP神经网络模型的指标值预测 运用MATLAB软件进行石羊河流域评价指标值的预测，以B31废污水排放量(单位面积化学需氧量排放量)指标值预测为例(图5)，可以依次得到其他32个指标的预测值。

由图5可以看出，石羊河流域单位面积化学需氧量排放量指标整体上呈波动变化态势；2013—2018年，预测值与真实值的拟合性非常好，预测值曲线与真实值变化曲线二者几乎完全重合，这说明预测模型具有非常好的拟合效果，并且误差也在允许范围内(表1)。根据预测值表及预测模型曲线，2019—2023年，单位面积化学需氧量排放量将呈现先上升后下降趋势，在2020年达到极大值。

3.3.2 石羊河流域水生态安全预警系统分析 根据石羊河流域2019—2023年的水生态安全评价指标预测值，由公式(3)计算得到，石羊河流域2019—2023年的水生态安全状况预警模糊综合评价结果(模糊综合评价指数)，得到模糊综合评价向量Y_2:

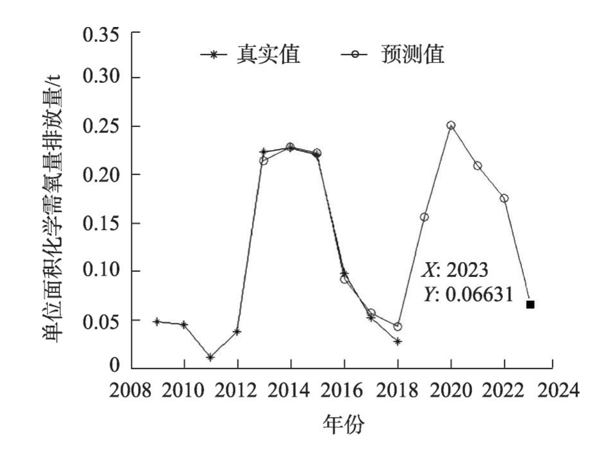


图5 单位面积化学需氧量排放量预测

Fig. 5 Forecast of chemical oxygen demand per unit area

$$Y_2=(0.36,0.34,0.32,0.31,0.38)^T$$

按照水生态安全评价结果分级标准可以看出，石羊河流域2019—2023年水生态安全状况均处于Ⅱ级(水生态安全状况为一般)及以上，总体上有了

表1　单位面积化学需氧量排放量预测值与真实值比较

Tab. 1　Comparison of predicted and real chemical oxygen demand per unit area

年份	真实值	预测值	误差	误差率
2013	0.2250	0.2152	−0.01	0.0000
2014	0.2286	0.2301	0.00	0.0065
2015	0.2220	0.2239	0.00	0.0087
2016	0.0991	0.0926	−0.01	−0.0662
2017	0.0529	0.0580	0.01	0.0962
2018	0.0284	0.0435	0.02	0.5345

较明显的提升。

从W-SENCE系统来看，石羊河流域的水生态安全预警评价显示（图6），社会子系统对流域水生态安全的影响相对最大，模糊综合评价指数年均值为0.08，累计贡献率为24%，其次为资源子系统和经济子系统，模糊综合评价指数均为0.07，贡献率为21%，生态子系统模糊综合评价指数为0.06，贡献率为19%，环境子系统的影响相对最小，模糊综合评价指数为0.05，贡献率为15%。因此，社会子系统仍然是今后石羊河流域水生态安全的最主要驱动力来源。

从PSR系统来看，石羊河流域水生态安全预警评价显示（图7），状态子系统对流域水生态安全的影响相对最大，模糊综合评价指数年均值为0.131，贡献率为39%，其次为响应子系统，为0.107，贡献率为31%，压力子系统的影响相对最小，模糊综合评价指数为0.104，贡献率为30%。因此，状态子系统是今后石羊河流域水生态安全的主要驱动力来源。

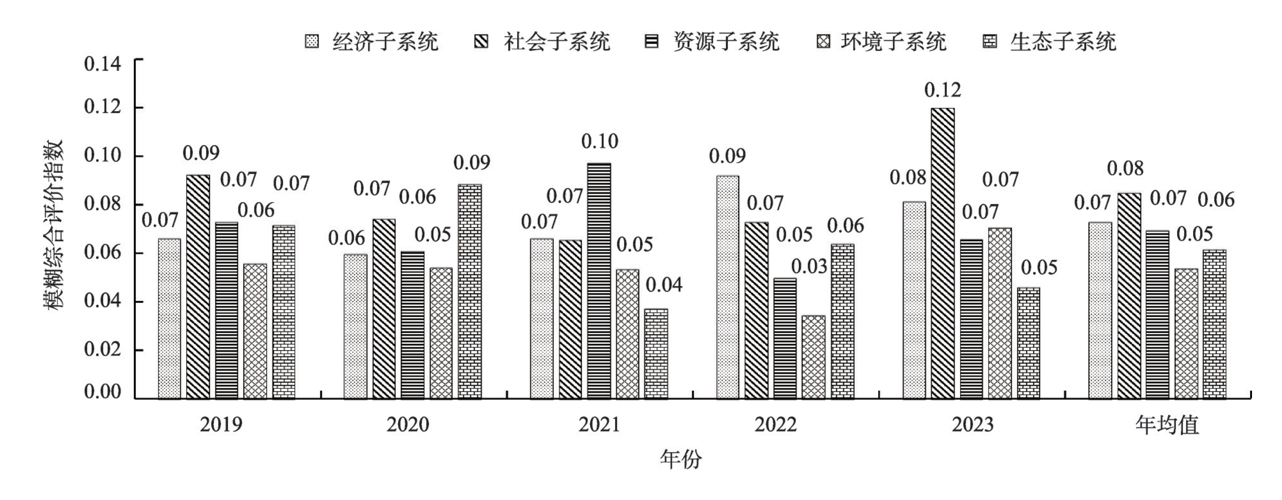


图6　基于W-SENCE系统的水生态安全评价结果

Fig. 6　Fuzzy comprehensive evaluation results of water ecological security evaluation based on the W-SENCE system

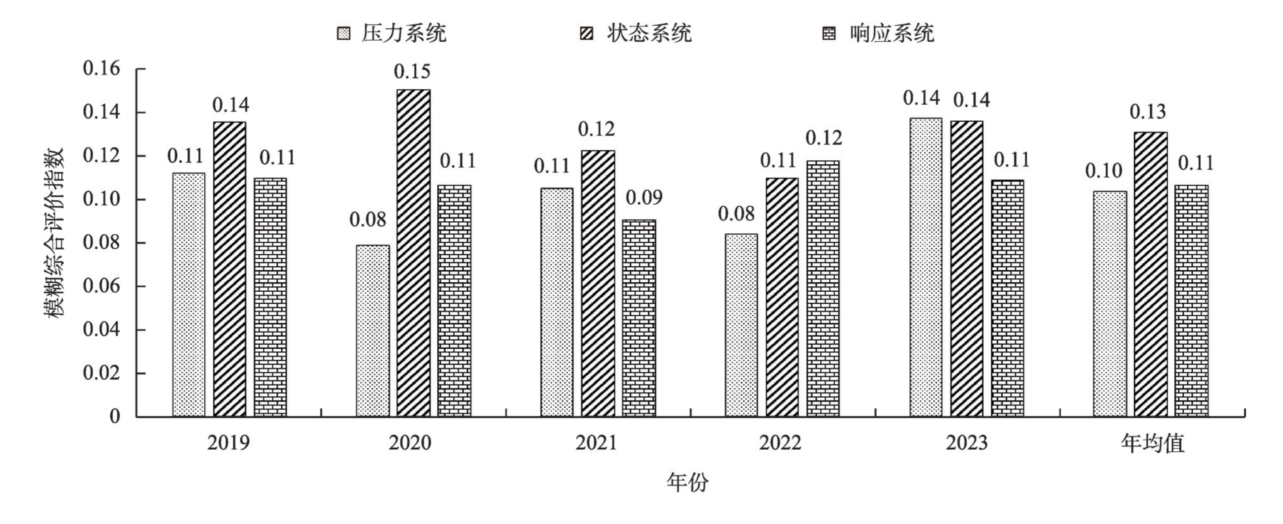


图7　PSR系统视角的水生态安全评价结果

Fig. 7　Evaluation results of water ecological security from PSR system perspective

4 结 论

本文以石羊河流域2009—2018年水生态安全数据为基本数据源,基于W-SENCE-PSR框架模型从5个方面构建内陆河流域水生态安全评价指标体系,运用模糊系统分析和BP神经网络模型多层面多角度解析流域水生态安全驱动机制,分析流域水生态安全当前状况,预测流域整体变化趋势,主要结论如下:

(1) 当年降水变化、单位面积牲畜头数、生态环境用水量占总用水量比例、雨水利用量、径污比这5个指标是石羊河流域水生态安全的最主要影响因子,发展节水灌溉农业,保障生态环境用水,控制牲畜数量,加强水行政管理等措施是当前提高流域水生态安全的最有效途径。

(2) 在水生态安全现状系统分析中,从SENCE视角和PSR视角分析显示,SENCE系统中,社会子系统和资源子系统对流域水生态安全的影响相对最大;PSR系统中,响应子系统对流域水生态安全状况影响最大,资源性缺水问题和水资源过度开发利用是石羊河流域水生态安全的主要驱动力因素。

(3) 在水生态安全预警评价及系统分析中,2019—2023年,石羊河流域的SENCE系统中,社会子系统对流域水生态安全的影响相对最大;PSR系统中,状态子系统对流域水生态安全状况影响最大,当前在关注石羊河流域水资源变化情况的同时,要持续关注水资源供需矛盾问题。

(4) 石羊河流域2009—2018年水生态安全模糊综合评价指数介于0.27~0.34之间,Ⅰ级(水生态安全状况较差)的占比为50%,Ⅱ级(一般)的占比为50%,石羊河流域实施河长制后,在2016—2018年期间,水生态安全评价指数均在0.3以上(Ⅱ级),河长制的实施对流域水生态安全具有明显的推动作用。预警评价中(2019—2023年),石羊河流域的模糊综合评价指数均在0.3以上,水生态安全状况明显趋于好转。

参考文献(References):

[1] 李梦怡, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游水生态安全评价及驱动要素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 39−47. [Li Mengyi, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Evaluation of ecological eater security and analysis of driving factors in the lower Tarim River, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 39−47.]

[2] 李佩成, 冯国章. 论干旱半干旱地区水资源可持续供给原则及节水型社会的建立[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2): 1−2. [Li Peicheng, Feng Guozhang. On the principle of sustainable supply of water resources in arid and semi-arid areas and the establishment of water-saving society[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1997, 15(2): 1−2.]

[3] 常跟应, 张文侠. 基于生态文明的疏勒河流域大规模移民反思[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 405−409. [Chang Genying, Zhang Wenxia. Ecological civilization-based rethinking of large-scale immigration and land development along Shule River[J]. Journal of Landzhou University (Natural Sciences Edition), 2014, 50(3): 405−409.]

[4] Chen Huawei, Gao Xue, Liu Jian, et al. Study on water ecological security evaluation model based on multivariate connection number and markov chain[J]. Advanced Materials Research, 2013, 726−731: 4000−4007.

[5] 戴文渊, 陈年来, 李金霞, 等. 基于SENCE概念框架的区域水生态安全评价研究——以甘肃地区17流段为例[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1332−1340. [Dai Wenyuan, Chen Nianlai, Li Jinxia, et al. Regional water ecological security evaluation based on SENCE conceptual framework: Taking 17 flow sections in Gansu Province as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1332−1340.]

[6] 徐斌, 申恒伦, 胡长伟, 等. 基于DPSIR模型和改进的群组AHP法的岸堤水库水生态安全评价[J]. 人民珠江, 2018, 39(1): 40−43. [Xu Bin, Shen Henglun, Hu Changwei, et al. Evaluation of water eco-security of Andi Reservoir based on DPSIR model and improved group AHP method[J]. Pearl River, 2018, 39(1): 40−43.]

[7] 章光新, 武瑶, 吴燕锋, 等. 湿地生态水文学研究综述[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 737−749. [Zhang Guangxin, Wu Yao, Wu Yanfeng, et al. A review of research on wetland ecohydrology[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 737−749.]

[8] 阿布都热合曼·哈力克. 塔里木河流域生态安全及其评价研究[J]. 水文, 2011, 31(5): 42−46. [Abdulrahman Harik. Tarim River Basin ecological security and evaluation study[J]. Hydrology, 2011, 31(5): 42−46.]

[9] 王雪梅, 刘静玲, 马牧源, 等. 流域水生态风险评价及管理对策[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 237−245. [Wang Xuemei, Liu Jingling, Ma Muyuan, et al. Aquatic ecological risk assessment and management strategies in a watershed: An overview[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(2): 237−245.]

[10] Cui Lu, Zhao Yonghua, Liu Jianchao, et al. Landscape ecological risk assessment in Qinling Mountain[J]. Geological Journal, 2018, 53: 342−351.

[11] 戴文渊. 基于W-SENCE-PSR框架的河西内陆河流域水生态安全评价研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021. [Dai Wenyuan. Regional Water Ecological Security Eccaluation Based on W-SENCE-

PSR Framework: A Case Study of Hexi Inland River Basin[J]. Lanzhou: Gansu agricultural University, 2021.]

[12] 尹文涛. 基于水生态安全影响的沿海低地城市岸线利用规划研究——以天津滨海新区为例[J]. 天津: 天津大学, 2015. [Yin Wentao. Research of Shoreline Using and Planning in Coastal Lowland City Based on Water Ecological Security: A Case Study in Tianjin Binhai New Area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.]

[13] 戴文渊, 陈年来, 李金霞, 等. 河西内陆河流域水生态安全评价研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 89-98. [Dai Wenyuan, Chen Nianlai, Li Jinxia, et al. Evaluation of water ecological security in Hexi Inland River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 89-98.]

[14] 戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 基于模糊综合评价的兰州市水生态安全指标体系研究[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 804-809. [Dai Wenyuan, Zhang Rui, Cheng Ziyong, et al. Research on water ecological security index system in Lanzhou based fuzzy comprehensive evaluation[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 804-809.]

[15] 张晓岚, 刘昌明, 赵长森, 等. 改进生态位理论用于水生态安全优先调控[J]. 环境科学研究, 2014, 27(10): 1103-1109. [Zhang Xiaolan, Liu Changming, Zhao Changsen, et al. Study on priority regulation for water ecological security based on niche theory[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(10): 1103-1109.]

[16] 王影. 生态安全的动态评价及多层次分析[D]. 天津: 天津大学, 2015. [Wang Ying. Dynamic Assessment and Comprehensive Analysis of Ecological Safety[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.]

[17] 康绍忠, 粟小玲, 杜太生. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. [Kang Shaozhong, Su Xiaoling, Du Taisheng. Water Resources Transformation Law and Watersaving Regulation Model in Northwest Arid Aegion: A Case Study of Shiyang River Basin[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009.]

[18] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较——基于"总量-相关指标-结构"分析框架[J]. 自然资源学报, 2017, 2(1): 76-87. [Wu Zhaodan, Zhao Min, Tian Ze, et al. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: In the analytical framework of "amount- relative index- structure" [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 2(1): 76-87.]

[19] 张义. 水生态安全初论[J]. 水利发展研究, 2017, 17(1): 27-31. [Zhang Yi. Water ecological security theory[J]. Water Conservancy Development Research, 2017, 17(1): 27-31.]

[20] Hong Qian, Meng Qingbin, Wang Pei, et al. Regional aquatic ecological security assessment in Jinan, China[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2010, 13(3): 319-327.

[21] Chang M Q, Huang Q. The Theory and Method of Water Resources Security[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.

[22] 魏冉. 辽宁省辽河流域水生态功能三级区水生态安全评价[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013. [Wei Ran. Assessment of Water Ecological Security Based on the Third Level Aquatic Ecoregion of Liao River Basin[D]. Shenyang: Liaoning University, 2013.]

[23] 张凤太, 苏维词. 基于均方差-TOPSIS模型的贵州水生态安全评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(9): 88-92, 103. [Zhang Fengtai, Su Weici. Ecological security of water in Guizhou based on mean square deviation-TOPSIS model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(9): 88-92, 103.]

[24] 李梦娣, 范俊韬, 孔维静, 等. 河流山区段水生态安全评估——以太子河为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2685-2694. [Li Mengdi, Fan Juntao, Kong Weijing, et al. Assessment of aquatic ecological security for mountainous rivers: A case study in the Taizi River Basin, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2685-2694.]

[25] 陈广. 基于DPSIR模型的三峡库区水生态安全评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. [Chen Guang. Water Ecological Safety Assessment of Three Gorges Reservoir Area Based on DPSIR Model [J]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.]

[26] 李辉. 生态安全评价理论体系研究与实例分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2004. [Li Hui. Theoretical Research on Ecological Security Assessment System and Case Study Analysis[D]. Shenyang: Northeastern University, 2004.]

[27] Xu Wenjie, Chen Weiguo, Zhang Xiaoping, et al. Study on urban water ecological security assessment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295: 829-832.

[28] 陈华伟, 黄继文, 张欣, 等. 基于DPSIR概念框架的水生态安全动态评价[J]. 人民黄河, 2013, 35(9): 34-37, 45. [Chen Huawei, Huang Jiwen, Zhang Xin, et al. Dynamic evaluation of water ecological security based on DPSIR concept framework[J]. Yellow River, 2013, 35(9): 34-37, 45.]

[29] 戴文渊. 基于模糊综合评价的甘肃地区水生态安全评价指标体系研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016. [Dai Wenyuan. Research on Ecology Security Index System in Gansu Area Based Fuzzy Comprehensive Evaluation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.]

[30] 戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 基于模糊系统分析的水生态安全评价研究——以北方四市为例[J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 23-26, 44. [Dai Wenyuan, Zhang Rui, Cheng Ziyong, et al. Fuzzy system analysis-based study on safety assessment of water ecology: Cases of four cities in North China[J]. Water Resources and Engineering, 2015, 46(9): 23-26, 44.]

[31] 张耀宗, 张勃, 张多勇, 等. 1960—2018年黄土高原地区蒸发皿蒸发时空变化特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 1-9. [Zhang Yaozong, Zhang Bo, Zhang Duoyong, et al. Spatio temporal patterns of pan evaporation from 1960 to 2018 over the Loess Plateau: Changing properties and possible causess[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 1-9.]

[32] 陈春波, 彭建, 李刚勇. 新疆草地生态系统健康评价体系构建[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 270-281. [Chen Chunbo, Peng Jian, Li Gangyong. Evaluating ecosystem health in the grasslands of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 270-281.]

Water ecological security influence factor and driving mechanism research in Shiyang River Basin

DAI Wenyuan[1], GUO Wu[1], ZHENG Zhixiang[2], CHEN Yichen[1], ZHANG Rui[3], XU Yong[1]

(1. Environmental Law College, Gansu University of Political Science and Law, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Evidence Science Techniques Research and Application, Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The water ecological security evaluation index system was constructed based on the complex ecosystem (social-economic-compound ecological system and pressure-state-response model) concept. From 2009 to 2018, the statistical data of Shiyang River Basin were used. The fuzzy system analysis method and BP neural network model were used to analyze the many aspects of the driving mechanism of water ecological security in the Shiyang River Basin. The results showed that the precipitation change, livestock, ratio of ecological environment water consumption per unit area to total water use, rainwater utilization, and diameter fouling were the main influencing factors of water ecological security in the river basin during the study period. From the W-SENCE system view, the current influence degree of water ecological security were ranked as follows: resources subsystem≥social subsystem>economic subsystem>environment subsystem>ecological subsystem; from the PSR system view: response subsystem>pressure subsystem>status subsystem; the resources and pressure subsystems were the main driving force of water ecological security from 2009 to 2018. The pressure and environment subsystems were the main driving force of water ecological security from 2019 to 2023. In the last ten years, water ecological security of the Shiyang River Basin was still in the level Ⅰ area (poor) and level Ⅱ area (in general). Overall, the situation was poor.

Keywords: compound ecosystem; fuzzy system analysis; BP neural network; water ecological security; Shiyang River Basin